

# ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DOS PROCESSOS DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES EM FLORIANÓPOLIS-SC PARA REDUÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Bruno Vieira Luiz <sup>(1)</sup>; Cássio Aurélio Suski <sup>(2)</sup>

(1) Estudante do Mestrado em Clima e Ambiente; IFSC; Florianópolis; SC;  
[brunovieiraluiz@gmail.com](mailto:brunovieiraluiz@gmail.com)

(2) Professor; IFSC; Florianópolis; SC; [cassio.suski@ifsc.edu.br](mailto:cassio.suski@ifsc.edu.br).

**Resumo:** A gestão dos RSU tem relação direta com o aquecimento global, pois possibilita a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) pela decomposição dos resíduos e o reaproveitamento dos materiais evitando partes significativas dos processos de produção, os quais emitem direta ou indiretamente gases que contribuem para o aumento do efeito estufa. O estudo pretende propor alternativas tecnológicas para a gestão dos RSU do município de Florianópolis-SC, utilizando a Análise de Ciclo de Vida (ACV) para quantificar as emissões atuais de gases de efeito estufa (GEE), bem como de cenários propostos, visando a valorização dos resíduos por meio de compostagem, biodigestores anaeróbios, reciclagem e geração de energia. Serão estabelecidos 5 cenários com percentuais de reciclagem, compostagem, digestão anaeróbica, geração de energia e destinação em aterro sanitário. Posteriormente, serão analisadas as emissões de GEE de cada cenário por meio do software Waste Reduction Model (WARM). Os resíduos serão categorizados em 54 categorias diferentes e realizada a modelagem no software, obtendo-se o cenário base que será utilizado para comparação com os cenários propostos, nos quais serão incluídas alternativas tecnológicas de valorização de RSU, quantificando assim a redução de GEE.

Palavras-chave: resíduos sólidos urbanos, gases de efeito estufa, valorização de resíduos.

## INTRODUÇÃO

O aquecimento global e a consequente redução de emissão de GEE são importantes preocupações relacionadas ao clima e ao meio ambiente. A falta de investimentos aliado à falta informações e de projetos práticos por parte do poder público justifica o lento avanço nas conquistas ambientais nesta área.

Para minorar os impactos negativos referente à emissão de GEE, políticas públicas e programas governamentais devem ser compatibilizados com os princípios, objetivos, diretrizes e instrumentos da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187/2009.

O aumento da temperatura global é potencializado pelas ações antrópicas que interferem no efeito estufa natural do planeta, devido ao aumento de emissões de GEE oriundos da queima de combustíveis fósseis pela exploração de recursos naturais em busca de matérias primas para fabricação de novos produtos e pela decomposição de resíduos em aterros sanitários e outras formas de disposição inadequadas. Os principais gases gerados pela decomposição dos RSU são o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e gás metano (CH<sub>4</sub>).

A gestão dos resíduos sólidos tem relação direta com o aquecimento global, seja minimizando as emissões de carbono pela decomposição dos resíduos, seja com o reaproveitamento dos materiais evitando partes significativas dos processos de produção, os quais emitem direta ou indiretamente partículas que contribuem para o aumento do efeito estufa.

Dentre os objetivos e metas da PNMC está a redução de emissão de GEE relacionados com a decomposição de resíduos sólidos, prevendo a criação de “medidas que estimulem o desenvolvimento de processos e tecnologias, que contribuam para a redução de emissões e remoções de gases de efeito estufa” (Art. 6º, XII).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) - Lei nº 12.305/2010, coerentemente com a PNMC definiu entre os seus objetivos a adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas, como forma de minimizar impactos ambientais (Art. 7º, IV), e o incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados à melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, inclusive a recuperação e o aproveitamento energético (Art. 7º, XIV). O principal instrumento da PNRS, os Planos de Gestão de Resíduos Sólidos deverão incorporar a atenção a estas questões para minimizar os impactos ambientais do transporte de resíduos em geral (neste aspecto, reduzindo a emissão de CO<sub>2</sub>) e da destinação dos resíduos orgânicos, como restos de alimentos, podas e rejeitos de indústrias alimentícias e agropastoris.

Portanto, essas políticas, através de suas diretrizes, objetivos e instrumentos se alinham e se unem em busca de um objetivo comum. Entretanto, apesar de marcos regulatórios serem instituídos, o índice de

reciclagem e recuperação energética no Brasil representa de 2 a 3% do total de resíduos gerados no país, sendo do restante produzido, 59,1% são encaminhados para Aterro Sanitário, 22,9% para Aterro Controlado e 18,0% para Lixões a céu aberto (ABRELPE, 2017).

No ano de 2018 a Prefeitura Municipal de Florianópolis realizou o beneficiamento de 3.437 toneladas de resíduos orgânicos, encaminhou para reciclagem 12.052 toneladas de recicláveis secos e destinou 193.829 toneladas de rejeitos para o Aterro Sanitário. Ou seja, de todos os resíduos produzidos no município, apenas 6% foram desviados do aterro sanitário, muito aquém do que poderia ser reaproveitado, muito embora esteja acima da média nacional.

Do ponto de vista de impacto ambiental, o aterramento de resíduos, mesmo que em aterros sanitários, é o pior cenário para disposição de resíduos sólidos urbanos em termos de emissão de gases de efeito estufa (IQBAL et. al., 2019; MOULT et. al., 2018).

Por isso deve-se buscar alternativas tecnológicas que sejam mais eficientes do que a simples disposição dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários, que contemplem a reutilização, reciclagem e recuperação energética. A adoção de alternativas combinadas reduzem significativamente a emissão de metano, gás carbônico e outros gases. Portanto, a geração de conhecimento e pesquisas na área é fundamental para subsidiar decisões de gestores quanto à adoção de alternativas tecnológicas. Ao contrário de outras áreas do saneamento, como tratamento de água e de esgoto, a temática de resíduos sólidos é insuficientemente estudada, havendo escassos investimentos e poucos pesquisadores nesta área.

O estudo pretende demonstrar que a implantação de tecnologias alternativas contribua com a redução de gases de efeito estufa, alcançando resultados satisfatórios no âmbito climático e ambiental.

## METODOLOGIA

O desenvolvimento do projeto se dividirá em 3 etapas: Estabelecimento dos cenários; Análise da emissão de GEE de cada cenário e Implementação de tecnologias alternativas.

O estabelecimento dos cenários será realizado com a combinação de diferentes tratamentos: reciclagem, compostagem, digestão anaeróbica, aterro sanitário e incineração com geração de energia. Esta combinação permitirá, por meio de modelagem utilizando a ACV dos resíduos, quantificar em termos de emissão de CO<sub>2</sub> equivalente qual o melhor cenário do ponto de vista ambiental.

O cenário base foi construído com os valores que atualmente o município apresenta em sua gestão, sendo 94% encaminhados ao Aterro sanitário e 6% à reciclagem, e servirá como base para comparação dos benefícios ambientais progressivos adotados pelo uso das tecnologias propostas.

O cenário 1 representa a pior opção do ponto de vista de emissão de GEE, com o encaminhamento de todos os RSU diretamente ao Aterro Sanitário.

O cenário 2 está próximo à gestão atualmente aplicada em Florianópolis, servindo como uma visão de curto prazo. Já o cenário 3 representa o alcance às metas de desvio do aterro sanitário a longo prazo, mantendo as alternativas de reciclagem e compostagem e incluindo a digestão anaeróbica para tratamento dos resíduos orgânicos.

No cenário 4 entra a alternativa de reaproveitamento energético através de incineração com geração de energia.

O cenário 5 representa a aplicação total das tecnologias propostas, excluindo o encaminhamento de resíduos para aterro sanitário.

Portanto, os cenários propostos terão a seguinte composição:

Cenário 1 – 0% para reciclagem, 0% para compostagem, 0% para digestão anaeróbica, 0% incineração com geração de energia e 100% para Aterro Sanitário;

Cenário 2 – 10% para reciclagem, 10% para compostagem, 5% para digestão anaeróbica, 0% incineração com geração de energia e 75% para Aterro Sanitário;

Cenário 3 – 20% para reciclagem, 15% para compostagem, 15% para digestão anaeróbica, 10% incineração com geração de energia e 40% para Aterro Sanitário;

Cenário 4 – 25% para reciclagem, 20% para compostagem, 20% para digestão anaeróbica, 15% incineração com geração de energia e 20% para Aterro Sanitário;

Cenário 5 – 30% para reciclagem, 25% para compostagem, 25% para digestão anaeróbica, 20% incineração com geração de energia e 0% para Aterro Sanitário.

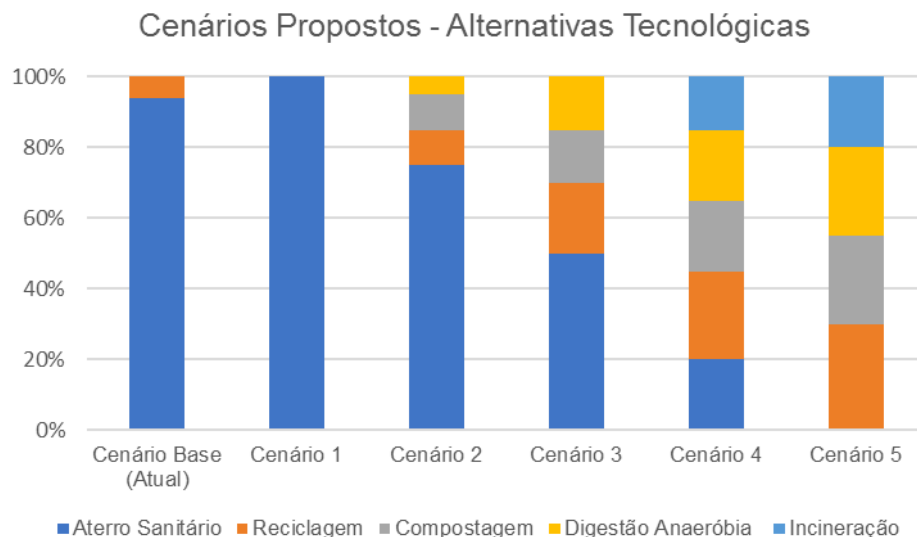


Figura 01. Cenários base e propostos, com a distribuição das tecnologias.

O cálculo da emissão de GEE será realizado utilizando o software WARM, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), o qual possui base de dados contendo a ACV dos diversos resíduos que compõe os RSU e considera o balanço de massa de gases de efeito estufa em termos de emissão de dióxido de carbono equivalente expresso em toneladas, para cada cenário proposto.

A entrada de valores no software consiste no lançamento da quantidade de resíduos coletados por tipo de material, separados em 54 categorias diferentes. O quantitativo de RSU será o total coletado no município de Florianópolis, com dados fornecidos pela COMCAP, o qual possui dados históricos das coletas convencional, seletiva, de resíduos orgânicos, de rejeitos, etc. Também será possível a segregação dos valores em termos das diferentes categorias de materiais para entrada no software, já que o município realizou em 2017 a caracterização dos resíduos produzidos em Florianópolis, sendo possível informar a porcentagem de cada categoria de resíduo.

Uma vez lançados os cenários no software, será possível a comparação entre as emissões de GEE produzidas em cada um dos cenários, o que indicará qual opção é a mais adequada.

Os ganhos potenciais relacionados à redução de emissão de GEE com a aplicação de cada tecnologia, em resumo, consiste em:

**Reciclagem:** a redução de exploração de matéria prima para gerar novos produtos, além de preservar os recursos naturais, acarreta na redução de energia gasta para produzir novos produtos. O caminho alternativo ao aterramento de parte dos RSU – destinar novamente à indústria como matéria prima, demanda menor gasto com a exploração dos recursos naturais, transporte e beneficiamento, ocasionando redução significativa de emissão de GEE.

**Compostagem:** o tratamento dos resíduos orgânicos através da compostagem resulta em eficiência energética não apenas na produção de gases durante o processo de decomposição. Isso porque, a aplicação do composto orgânico resultante aumenta a qualidade do solo, resultando em menor quantidade necessária de fertilizantes sintéticos, e, também, diminui a erosão do solo e reduz o uso de herbicidas. Outros benefícios são: a eficiência energética obtida pela diminuição de consumo de água; o aumento da capacidade produtiva do solo; e, o aumento da atividade microbiana, que resulta em um solo de maior qualidade. Portanto, espera-se significativa redução de emissão de GEE no processo global, demonstrando menor emissão nas demais etapas de utilização do composto em solo para agricultura e na redução do uso de fertilizantes e agrotóxicos.

**Digestão anaeróbica:** com benefícios similares à opção de compostagem, a digestão de RSU orgânicos sob temperatura e umidade controladas em reatores anaeróbicos devidamente dimensionados, permite o reaproveitamento energético através da captação e transformação em energia elétrica e/ou térmica com o beneficiamento o gás metano gerado no processo.

**Incineração:** a transformação de rejeitos em energia térmica, ao contrário do que habitualmente se imagina, ocasiona redução de gases de efeito estufa. Do ponto de vista energético, o tradicional encaminhamento ao Aterro Sanitário desperdiça todo potencial de geração de energia dos resíduos, deixando-os decompor ao longo do tempo, gerando emissão de GEE e outros impactos ambientais. Do contrário, a geração de energia através desta massa, substitui outras fontes de geração energia, como termoeletricas por exemplo.

O aterramento dos resíduos, além de gerar impactos em sua disposição, como efluentes líquidos e gasosos, finda o ciclo dos materiais que ali se encontram, os quais poderiam se transformar em outros

materiais ou serem recuperados energeticamente, como geração de energia.

A gestão e operacionalização dos RSU no município de Florianópolis é realizado pela Autarquia Melhoramentos da Capital – COMCAP, a qual realiza a limpeza pública e coleta de resíduos além de definir as tecnologias a serem aplicadas para a destinação e disposição final dos resíduos.

A reciclagem será realizada por associações de catadores, sendo encaminhados todos resíduos coletados pela coleta seletiva porta a porta, atendendo as diretrizes da Lei nº 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos. A própria COMCAP também realiza a reciclagem de alguns tipos de resíduos que são triados e beneficiados no Centro de Valorização de Resíduos – CVR, como pneus, vidros, madeiras, eletrônicos, metais, dentre outros.

A compostagem ocorrerá por meio de leiras no CVR da própria COMCAP, mesmo local proposto para a implantação de digestores anaeróbicos, com a utilização de resíduos orgânicos coletados em grandes geradores, tais como restaurantes, supermercados, hotéis, feiras, dentre outros. Para os cenários futuros – 3, 4 e 5, será considerada a ampliação da coleta seletiva de orgânicos para os domicílios, em função da quantidade significativa de orgânicos – 30, 40 e 50%, consecutivamente.

A incineração com geração de energia será proposta a ser implementada em municípios próximos, já que Florianópolis não dispõe de áreas adequadas dentro do Plano Diretor para tal.

Portanto, a utilização da ferramenta de ACV dos RSU considerará o balanço entre a geração de GEE nos diferentes cenários propostos, indicando as vantagens de cada tecnologia, quantificando os ganhos ambientais com a utilização destas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo pretende obter resultados com a criação de cenários e proposição de tecnologias de tratamento de resíduos sólidos urbanos para estimular técnicos e gestores municipais a adotarem alternativas ambientalmente mais adequadas do ponto de vista de emissão de GEE, demonstrando os benefícios ambientais relacionados com a mudança de gestão a ser adotada. Ou seja, pretende-se formular uma ferramenta para comparação das diferentes possibilidades de aplicação de tecnologias para tratamento dos resíduos em termos de valorização ambiental, demonstrando em termos de emissão de gases de efeito estufa a configuração mais adequada a ser adotada no processo.

Serão relacionadas as tecnologias de tratamento com a quantidade que será reduzida de emissão de GEE, permitindo os tomadores de decisão visualizarem o benefício ambiental em termos quantitativos da aplicabilidade de cada alternativa. Espera-se mudar a concepção atual de que o aterramento de resíduos é a solução mais adequada. O aumento do encaminhamento de recicláveis para cooperativas e associações de catadores por exemplo, gerarão benefícios socioeconômicos, além de reduzir a exploração de recursos naturais para fabricação de novos produtos, reduzindo o impacto ambiental de todo processo com a recuperação energética e/ou reutilização na cadeia produtiva em substituição às matérias primas.

Já a recuperação energética por meio de biodigestor e incineração não apenas reduzirá a quantidade encaminhada aos aterros sanitários, mas também estenderá a vida útil destes, além de gerar energia elétrica e/ou térmica alternativa, reduzindo a geração de GEE das usinas tradicionais pela substituição desta fonte de energia.

Além disso, pretende-se demonstrar por meio das ferramentas de ACV que o tratamento de orgânicos pelo processo de compostagem e biodigestão, além de reduzir a emissão de GEE em comparação ao aterro sanitário, pode reduzir o impacto causado pelo transporte, além da geração de composto orgânico para ser aplicado em agricultura e paisagismo urbano, reduzindo o uso de fertilizantes e herbicidas e, conseqüentemente o impacto gerado pelo processo de fabricação e aplicação destes. A compostagem resultará em eficiência energética não apenas na produção de gases durante o processo de decomposição, mas também na qualidade do solo, redução da erosão do solo e redução de consumo de água.

A incorporação da alternativa de implantação de usina de geração de energia elétrica a partir da incineração de RSU, permitirá a mudança de paradigma de que esta seria a mais impactante ao meio ambiente, demonstrando que pode vir a ser uma alternativa menos impactante ao meio ambiente quando comparada ao tradicional aterro sanitário, para que municípios possam adotar este tipo de tratamento dentro das ações de gestão dos resíduos sólidos urbanos.

Portanto, existem diversas alternativas de tratamento e disposição final que não a tradicionalmente adotada, havendo larga possibilidade de reduzir a emissão de GEE do processo global de gestão dos resíduos sólidos urbanos.

## CONCLUSÕES

Será verificada a hipótese de que a inserção de tecnologias alternativas às usuais no tratamento dos RSU reduzem significativamente as emissões de GEE resultantes dos processos de decomposição dos

resíduos, das emissões relacionadas ao transportes e das emissões referentes à exploração de matérias primas e geração de energia que deixarão de serem emitidas através da reciclagem e recuperação energética dos resíduos a serem valorizados.

Visto que serão utilizados dados reais da geração de RSU no município de Florianópolis-SC, será permitida a quantificação em termos de tonelada equivalente de CO<sub>2</sub> em que cada cenário proposto teria potencial de gerar e, comparando-se com o cenário base, certificando a contribuição de cada cenário na redução de geração de GEE.

O estudo permitirá a ampliação de conhecimento e futuras pesquisas baseadas na Análise de Ciclo de vida das diferentes frações que compõe os resíduos sólidos municipais, já que a aplicação deste conceito na quantificação de redução de GEE dos RSU é novo e pouco difundido em nível mundial, havendo escassos estudos disponíveis nesta área.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2017.

BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Burlington: Ed. Elsevier, 2010

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). Diário oficial da República Federativa do Brasil, Poder Legislativo, Brasília, DF, 29 dez 2009, Seção 1, Edição Extra, p. 109.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Diário oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Legislativo, Brasília, DF, 3 de agosto de 2010, Seção 1, p. 3.

BRASIL. Decreto nº 7.390, de 09 de dezembro de 2010. Diário oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 10 dez 2010, Seção 1, p. 4.

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Method For Estimating Greenhouse Gas Emission Reductions From Diversion of Organic Waste From Landfills to Compost Facilities*. Disponível em: <https://www.arb.ca.gov/cc/waste/cerffinal.pdf>. Acessado em: 11.10.2018.

FLORIANÓPOLIS. Decreto Municipal nº 17.910, de 22 de agosto de 2017. Plano Municipal Integrado de Resíduos Sólidos. Diário oficial do município de Florianópolis, Poder Executivo, Florianópolis, SC, 22 ago 2017, Edição 2011, p. 6. IBGE. Pesquisa Nacional do Saneamento Básico, 2008.

IQBAL, A., ZAN, F., LIU, X., CHEN, G. Integrated municipal solid waste management scheme of Hong Kong: A comprehensive analysis in terms of global warming potential and energy use. *Journal of Cleaner Production*, v. 225, n. 2019, p. 1079–1088, 2019.

MOULT, J. A., ALLAN, S. R., HEWITT, C. N., BERNERS-LEE, M. Greenhouse gas emissions of food waste disposal options for UK retailers. *Food Policy*, v. 77, n. November 2017, p. 50–58, 2018.

SHIRALIPOUR, Aziz; MCCONNELL, Dannis B.; SMITH, Wayne H. Physical and chemical properties of soils as affected by municipal solid waste compost application. *Biomass and Bioenergy*, v. 3, n. 3-4, p. 261-266, 1992;

STANTEC CONSULTING Ltd., Waste to Energy: A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment. Practices – Final Report. Burnaby, BC, 2011.